ChinaXiv合作期刊

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究

梁鹏飞[1,2]， 辛惠娟[1]， 李宗省[2]， 张百娟[3]， 桂 娟[3]， 段 然[3]，
南富森[3]， 丁增扬平[4]， 杨盛梅[4]

（1. 兰州交通大学环境与市政工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院高寒山区同位素生态水文与国家公园观测站/甘肃省祁连山生态环境研究中心/内陆河流域生态水文重点实验室，甘肃 兰州 730000；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 西藏自治区水文水资源勘测局昌都水文分局，西藏 昌都 854000）

摘 要：基于黑河流域径流、气象和土地利用类型等资料，采用弹性系数等方法研究了黑河径流变化特征及影响因素。结果表明：（1）1990年后黑河流域径流量增加趋势明显加速，并且在黑河干流表现最为明显，1957—1990年莺落峡站径流量增加速率为$0.75\times10^8\ m^3\cdot(10a)^{-1}$，而1991—2020年其增加速率为$2.60\times10^8\ m^3\cdot(10a)^{-1}$，后者是前者的3.47倍，并且黑河全流域1990年后径流量增加主要发生在夏季和秋季，较1990年前分别增加了7.07%和26.58%。（2）径流对气候变化的响应在夏季最为敏感，并且降水是导致径流增多的主要气候因素，夏季降水量增多1.000%，同期径流量平均增多0.741%（$P<0.01$）。（3）2020年较1980年黑河流域耕地和建设用地面积相对增幅分别为24.20%和71.43%；草地和未利用土地面积相对降幅分别为1.30%和5.28%。径流量与林地面积、建设用地面积呈正相关，而径流量与草地面积呈负相关。研究结果可以为黑河流域水资源的科学管理、优化配置和后续生态工程的实施提供参考。

关 键 词：黑河；径流响应；气候变化；冰冻圈；影响因素
文章编号：

chinaXiv:202210.00156v1

在全球气候变暖背景下，有人认为温度变化趋势只是气候系统的年代际变化波动，然而AR6指出全球气候变暖并未停滞[1-2]。1990年后，全球极端气候发生频率呈显著增加趋势，特别是中国风暴灾害的发生频率更加频繁，相比较全球范围而言，上升趋势更为显著[3]。黑河流域在西北地区发挥着水源涵养、生物多样性保护、防风固沙和土壤保持等众多重要的生态功能[4-5]。近年来，黑河流域平均气温也呈现持续显著上升趋势，再加上人类活动的加剧影响，黑河流域生态环境虽然表现出整体向好发展，但局部地区仍有退化的现象[6]，比如上游水源区冰雪加速消融和冰川的持续退缩，中游用水区需水量持续增加和用水短缺，下游生态屏障区已成为沙尘天气的重要发源地[7-10]。在此背景下，黑河流域的降水、径流、下渗和蒸发的时空格局、机制和影响发生了深刻的变化，这些重大影响对该区域的水文过程和生态环境效应将会逐渐突出[11-12]。

国内外大量学者和研究人员已对黑河径流变化特征及影响因素驱动机制做了大量研究。程鹏等[13]的研究表明近60 a来黑河流域径流总体呈现出增多趋势，其变化主要受气温与降水的影响，其中降水影响更大。程文举等[14]研究了黑河上游极端气候变化对径流的影响，结果表明径流总量与极端洪水都呈增加趋势，并且极端降水是影响其变化的主要气象因素。李秋菊等[15]的研究也指出黑河上游径流显著增加，潜在蒸散发对径流增加起抑制作用，冰雪融水和降水对径流增加起促进作用。罗开盛等[16]通过研究黑河径流对不同土地利用变化

收稿日期：2021-11-29； **修订日期**：2021-12-28
基金项目：中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项；甘肃省黄河水环境重点实验室开放基金（21YRWEG005）；兰州交通大学校青年基金（2018005）；甘肃省创新群体项目（2020）；甘肃省陇原创新创业团队项目（2020）资助
作者简介：梁鹏飞（1998-），男，硕士研究生，主要从事寒旱区水文与水资源等方面的研究. E-mail: liangpf0113@163.com
通讯作者：李宗省（1984-），男，博士，研究员，主要从事寒区同位素水文与气候变化等方面的研究. E-mail: lizxhhs@163.com

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202210.00156v1

(LUCC)的敏感性发现，在空间上，径流对LUCC的敏感性从上、中、下游依次递减，在时间上，径流对LUCC的敏感性降低。尚星星[17]基于SWAT模型定量研究了在黑河上游径流的变化中，气候变化的贡献率远大于土地利用。金鑫等[18]基于LU-SWAT模型研究分析了不同土地利用类型对黑河流域径流的影响，指出1990—2001年径流变化是受林地面积减少所影响的，而2002—2009年径流变化主要是因为裸地的大面积减少所导致的。王宇涵等[19]研究指出气温升高导致高寒山区冻土活动层增厚，导致土壤蓄水量和降雨下渗量增多，最终导致区域径流增加。综上所述，气候变化、土地利用变化和冰冻圈变化已经成为影响黑河流域水资源时空变化的重要因素，开展气候变化、土地利用变化和冰冻圈变化对该区域径流的影响研究对于揭示该区域水文效应的变化机理和应对水资源管理挑战很有必要。

本文收集了黑河流域历史长序列径流、降水和土地利用等数据资料，全面深入地探讨了黑河流域干流及主要支流的径流时空变化特征及对气候变化、土地利用变化和冰冻圈变化的响应。

1 研究区概况

黑河流域(97.40°~101.72°E，37.73°~40.15°N)发源于祁连山，地处河西走廊中段，是西北干旱区最具代表性的内陆河。西与疏勒河流域相接，东与石羊河流域相邻，从上游到下游横跨不同的自然地理单元。本文以正义峡水文站以上区域为研究区，面积约12.86×10^4 km^2，平均海拔在2500 m以上，降水主要集中在5—9月，多年平均降水量为280 mm。莺落峡以上区域为黑河流域上游，该区域水文过程受人类活动影响较小，是主要的产流区，分布着多年冻土和季节性冻土，覆盖有森林和高寒草甸，多年平均气温低于2 ℃；莺落峡至正义峡流域的河西走廊区为黑河流域中游，分布有林地、草地和农田，为主要的水资源消耗区，多年平均气温6~8 ℃。研究区内水文站、气象站和雨量站点分布如图1所示。

2 数据与方法

2.1 数据来源

1980—2018年冰川边界数据和土地利用数据来自国家青藏高原科学数据中心网站(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)，其中土地利用数据包括1980年代末期和1990—2020年(5 a一期)共8期数据，空间分辨率10~100 m。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.gov.cn)，时间序列为1960—2017年。另外本文选取了黑河流域干流及

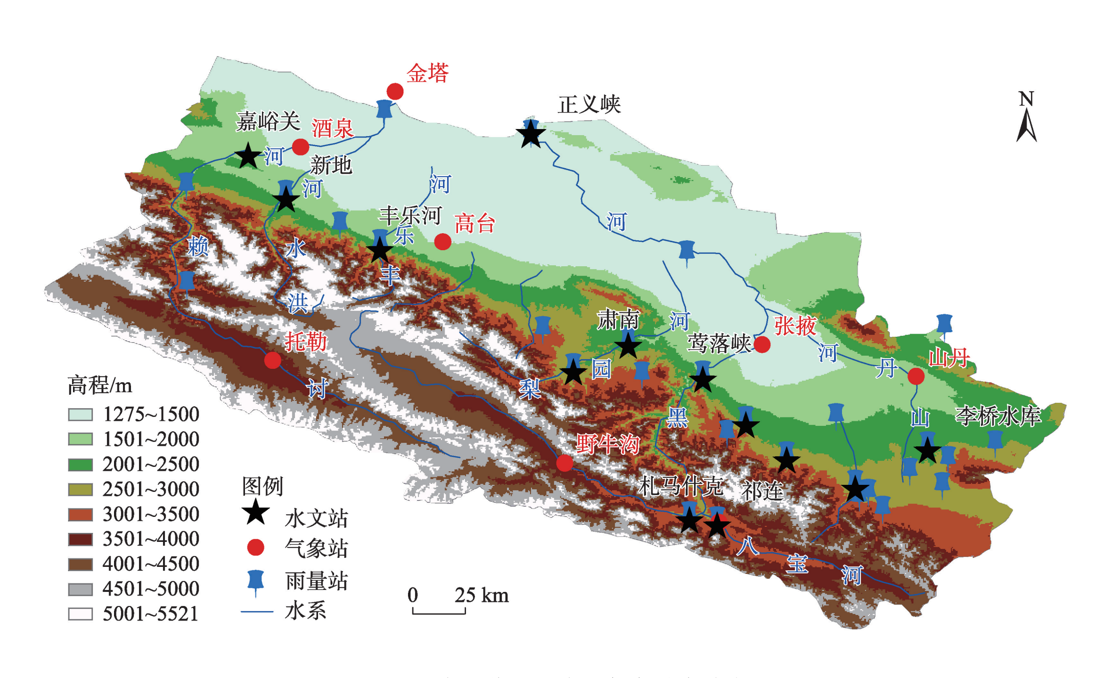


图1 研究区位置及水文气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of hydrological and meteorological stations

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202210.00156v1

主要支流的13个水文站和29个雨量站自建站以来至2020年的监测数据资料。

2.2 研究方法

2.2.1 丰平枯水年划分 根据国家标准《水文基本术语和符号标准》(GB/T50095—98)[20]，利用保证率划分丰平枯水年。操作步骤为：(1) 将径流序列 X_i 按从大到小排列；(2) 计算对应的经验频率序列 $P_m = \frac{m}{n+1}$，其中 m 为序列号，n 为数据总个数；(3) 根据表1给出的频率划分标准，确定不同水年的径流量范围。

表1 丰平枯水年频率划分标准[21]

Tab. 1 Classification standard of high/medium/low flow year according to frequency

丰平枯级别	频率/%
特丰水年	$P\leqslant 12.5$
丰水年	$12.5<P\leqslant 37.5$
平水年	$37.5<P\leqslant 62.5$
偏枯水年	$62.5<P\leqslant 87.5$
特枯水年	$P>87.5$

2.2.2 弹性系数 为了定量分析径流与气候变化之间的联系，采用Schaake的方法，研究径流对气候要素的的敏感性。定义弹性系数为：

$$\varepsilon = \frac{\delta Q/Q}{\delta X/X} \tag{1}$$

式中：ε 为弹性系数；Q 为径流量；X 为气候要素；$\frac{Q}{X}$ 为径流量 Q 对气候要素 X 的偏导数。

弹性系数非参数表达为[22]：

$$\varepsilon = \mathrm{median}\left[\frac{(Q_i - \bar{Q})/\bar{Q}}{(X_i - \bar{X})/\bar{X}}\right] \tag{2}$$

式中：Q_i 和 X_i 分别为径流和气候要素序列值；$\bar{Q}$ 和 $\bar{X}$ 分别为径流和气候要素平均值。

式(1)离散形式为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_i/\bar{Q}}{\Delta X_i/\bar{X}} = \frac{(Q_i - \bar{Q})/\bar{Q}}{(X_i - \bar{X})/\bar{X}} \tag{3}$$

式中：ΔQ_i 和 ΔX_i 分别为径流和气候要素平均值变化。本文采用滑动窗口法计算弹性系数，首先采用1960—1969年共10 a的逐月数据计算弹性系数，然后滑动1 a，采用1961—1970年的数据计算，各时段得到的值赋给首年，以此类推[23]。

3 结果与分析

3.1 径流变化特征

3.1.1 径流年内变化特征 讨赖河流域和八宝河流域的流量、降水年内分配如图2所示。结果表明，讨赖河流域和八宝河流域流量峰值滞后降水峰值1个月，说明降水量并未全部产流，而是将一部分水量储存起来，形成冻土层上水。这一现象主要发生在有冰川冻土存在的高海拔地区，如发源于祁连山的石羊河流域支流西营河和南营河，还有黄河源区也存在流量峰值滞后降水峰值现象[24-25]。其他流域流量峰值和降水峰值基本同步，每年7月同时期达到峰值，最小流量和最小降水发生在1月，具有较好的同步性。

3.1.2 径流年际变化特征 讨赖河流域(图3a)、洪水河流域(图3c)、丰乐河流域(图3e)、梨园河流域(图3g)、黑河干流(图3i)和八宝河流域(图3k)年径流量都呈现波动增加趋势，递增速率分别为 $0.02\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$、$0.17\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$、$0.06\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$、$0.11\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$、$0.97\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$ 和 $0.28\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$。过去几十年间，黑河流域径流量平均递增速率为 $0.28\times10^8\ \mathrm{m^3\cdot(10a)^{-1}}$，径流量共增加了

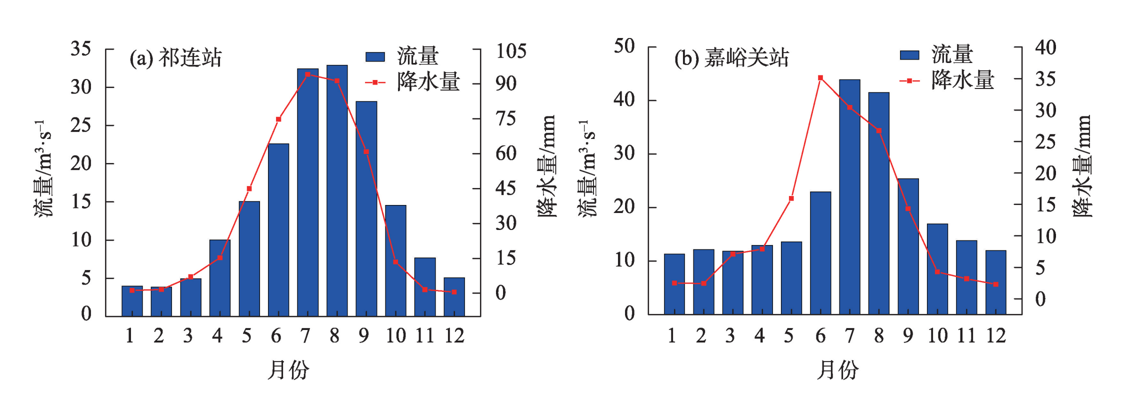


图2 八宝河流域和讨赖河流域流量-降水量年内分配

Fig. 2 Intra-annual distribution of flow-precipitation in the Babaohe River Basin and the Taolaihe River Basin

ChinaXiv合作期刊

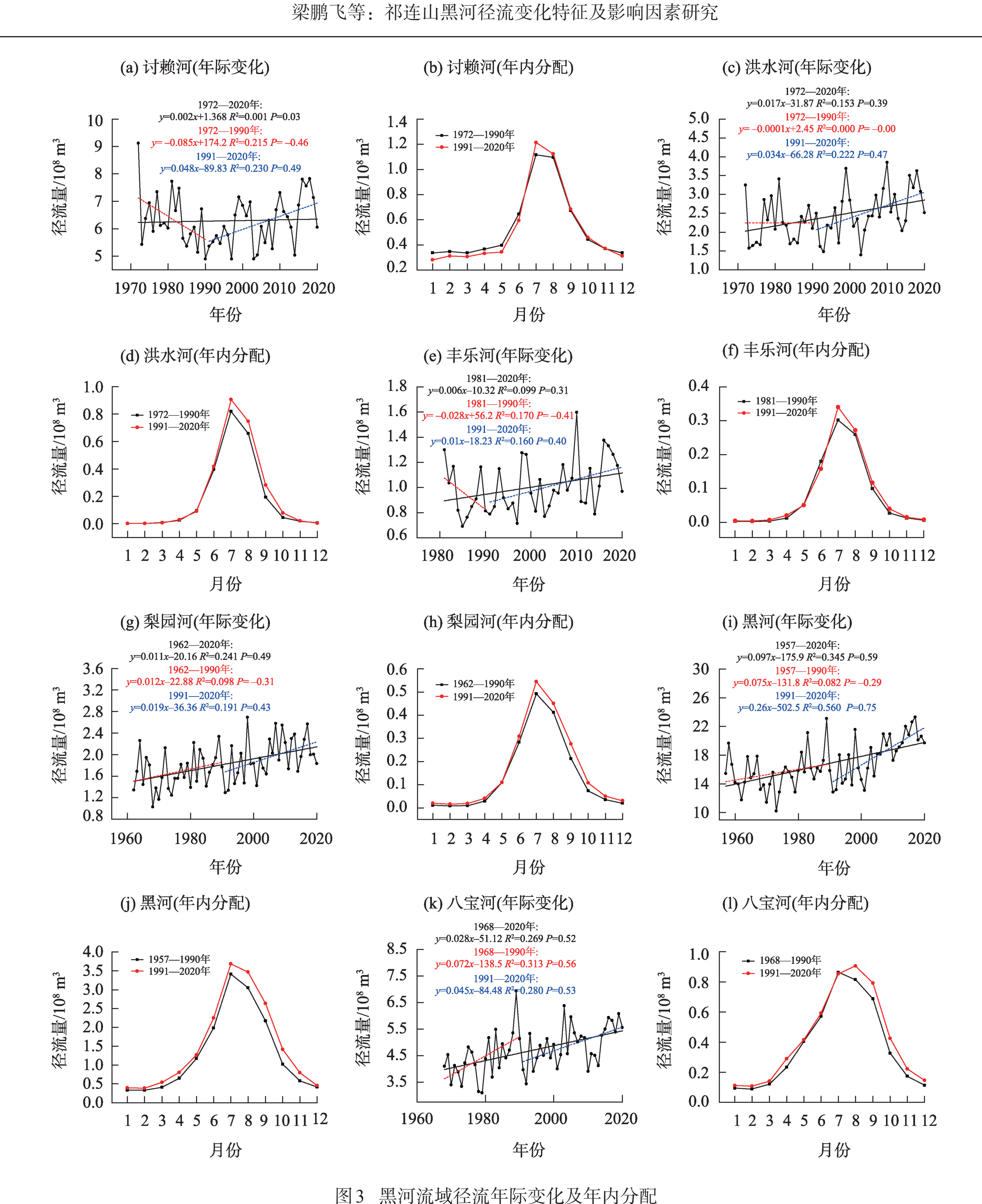


图3　黑河流域径流年际变化及年内分配

Fig. 3　Interannual variation and intra-annual distribution of runoff in the Heihe River Basin

12.93×10^8 m³。从图3可以看出，除支流八宝河流域1990年后径流量递增速率减小外，其他流域均表现为1990年后径流量递增速率明显增加现象，并且在黑河干流表现最为明显；1957—1990年黑河干流莺落峡站径流量增加速率为0.75×10^8 m³·(10a)$^{-1}$，而1991—2020年其增加速率为2.60×10^8 m³·(10a)$^{-1}$，是1957—1990年径流量变化幅度的3.47倍。

讨赖河流域1991—2020年相较于1972—1990年春季和冬季径流量分别减少了10.6%和11.1%，夏季和秋季分别增加了2.5%和1.9%（图3b）；洪水河流域1991—2020年相较于1972—1990年春季和冬季径流量分别减少了1.7%和14.0%，夏季和秋季分别增加了10.5%和49.8%（图3d）；丰乐河流域1991—2020年相较于1981—1990年春季、夏季、秋

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

季和冬季径流量分别增加了14.8%、3.9%、23.3%和44.5%(图3f);梨园河流域1991—2020年相较于1962—1990年春季、夏季、秋季和冬季径流量分别增加了15.0%、9.8%、35.1%和67.0%(图3h);黑河干流1991—2020年相较于1957—1990年春季、夏季、秋季和冬季径流量分别增加了16.8%、11.1%、28.3%和13.7%(图3j);八宝河流域1991—2020年相较于1968—1990年春季、夏季、秋季和冬季径流量分别增加了11.0%、4.6%、21.1%和23.1%(图3l)。总体而言,黑河全流域1990年后径流量增加主要发生在夏季和秋季,较1990年前分别增加了7.07%和26.58%,这与Li等[24]的研究一致,而丰乐河流域、梨园河流域和八宝河流域径流增加主要发生在冬季。

3.1.3 径流丰平枯变化特征 根据丰平枯水年径流量划分标准,分别统计了黑河流域扎马什克、莺落峡和正义峡水文站1957—2020年64 a间15组不同平均径流量类别的丰平枯水年出现频数,结果详见图4a、图4c和图4e。结果表明,黑河流域在过去64 a间整体以丰水年、平水年和偏枯水年为主,扎马什克、莺落峡和正义峡水文站这3种水年出现频数共计分别占总体的75.00%、74.60%和72.90%,特丰水年分别占总体的13.75%、14.17%和13.44%,特枯水年分别占总体的11.25%、11.23%和13.66%。扎马什克站在汛期特丰水年和特枯水年发生概率分别为17.19%和9.38%,在非汛期特丰水年和特枯水年发生概率分别为15.63%和9.38%;莺落峡站在汛期特丰水年和特枯水年发生概率都为10.94%,在非汛期特丰水年和特枯水年发生概率分别为17.19%和6.25%;正义峡站在汛期特丰水年和特枯水年发生概率分别为25.00%和28.13%,在非汛期特丰水年和特枯水年发生概率分别为9.38%和15.63%。以上表明,在黑河源区汛期和非汛期都容易发生极端洪水事件,黑河上游在非汛期容易发生极端洪水事件,而在中游汛期和非汛期都容易发生极端枯水事件。这是因为黑河源区和上游降水量本来就多,相比较中游而言人类活动对径流的影响较小,而中游由于是黑河流域的用水区,汛期蓄水,农作物生长期又放水灌溉,虽然水利工程的调蓄作用使得极端洪水事件减少,但中游需水量较大,所以更容易出现极端枯水事件。

由黑河流域丰平枯水年年代变化可以看出,扎马什克站特丰水年和丰水年发生概率一直处于增大趋势,特别是2010—2019年这10 a间,有8 a是特丰水年,2 a是丰水年;而特枯水年主要发生在20世纪70年代和90年代,各出现过3 a,其他年代主要以平水年和偏枯水年为主(图4b)。莺落峡站自1980年以来,特丰水年和丰水年发生概率明显增大,特别在近20 a,特丰水年和丰水年各出现过7 a和8 a;特枯水年也主要发生在20世纪70年代和90年代,分别出现过4 a和2 a,而60年代主要以偏枯水年为主,80年代以平水年为主(图4d)。正义峡站特丰水年主要出现在20世纪60年代、80年代和21世纪前10 a,分别出现了2 a、2 a和3 a,20世纪90年代比较干旱,有6 a是特枯水年(图4f)。总体来说,1990年后,黑河流域特丰水年和丰水年出现次数增多,在源区和上游这种现象比较明显,特别是2010年以来,黑河流域水资源明显增多,这对于干旱少雨的西北地区而言,水资源如何科学管理和合理分配存在着巨大的挑战。

3.2 径流对气候变化的响应

3.2.1 降水对径流的影响 以1960—2017年逐月的径流和降水资料,采用非参数公式计算得到黑河流域春季、夏季、秋季和冬季径流对降水的弹性系数分别为0.102($P<0.01$)、0.741($P<0.01$)、0.163($P<0.01$)和0.022($P>0.05$),既季节降水变化1.000%,四季径流平均变化分别为0.102%、0.741%、0.163%和0.022%(图5)。可以看出,黑河流域夏季径流对降水变化响应最为敏感。

3.2.2 气温对径流的影响 以1960—2017年逐月的径流和气温资料,采用非参数公式计算得到黑河流域春季、夏季、秋季和冬季径流对气温的弹性系数分别为−0.007($P>0.05$)、−1.482($P<0.05$)、0.064($P>0.05$)和−0.045($P>0.05$),既季节气温变化1.000%,四季径流平均变化分别为−0.007%、−1.482%、0.064%和−0.045%(负值表示变化趋势相反)。可以看出,黑河流域夏季径流对气温变化响应最为敏感,其他季节气温对径流的影响较小(图6)。

3.3 径流对土地利用变化的响应

土地利用变化对径流的影响主要体现在林地和草地面积的变化会改变流域蓄水功能,影响水源涵养能力,从而导致径流量的变化;而建设用地面积变化会导致不透水面积随即变化,改变汇流时间,导致径流量增减[26]。研究区中八宝河流域基本位于高海拔山区,而山丹河流域中下游分布于平原

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

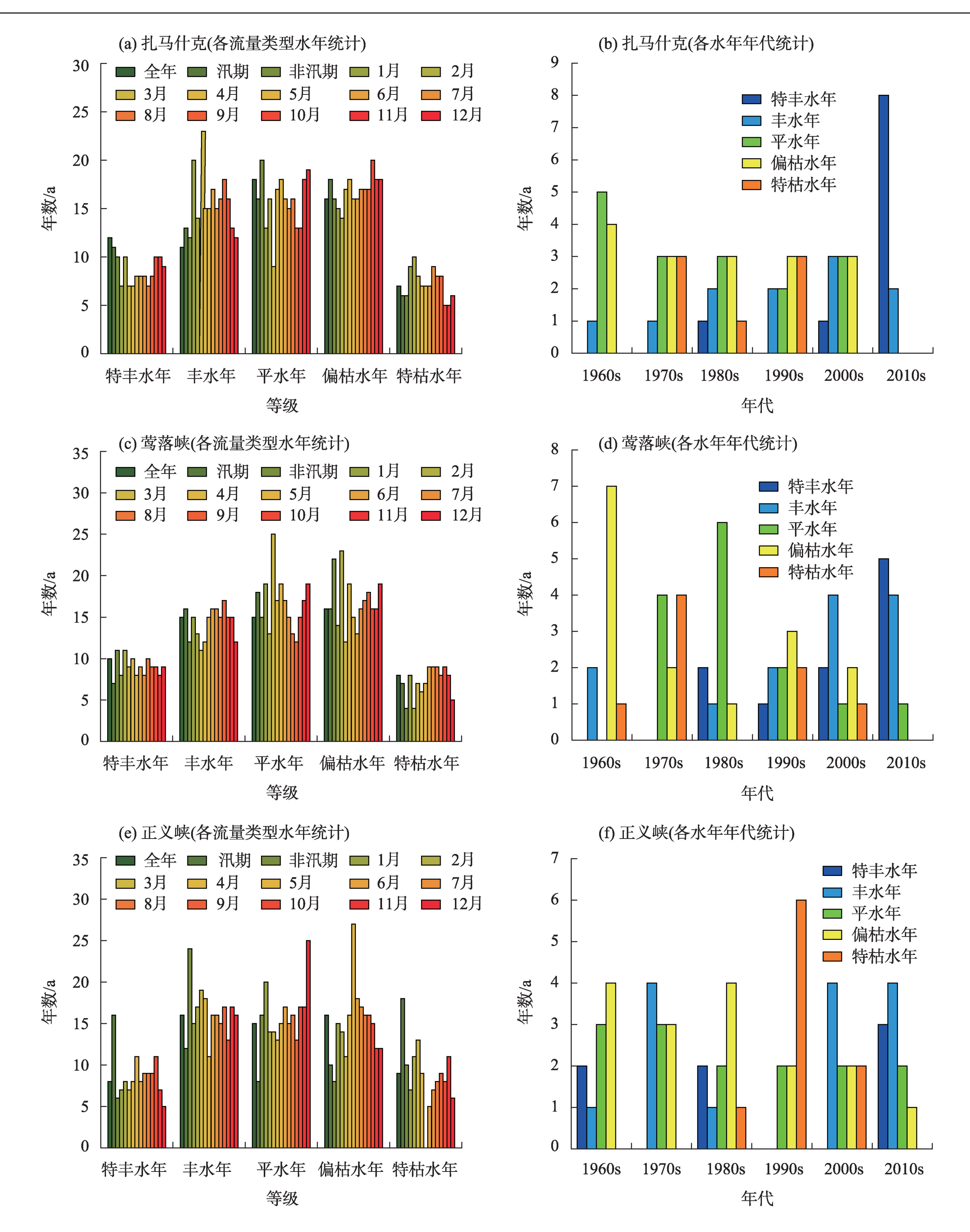


图4 黑河流域径流丰平枯水年统计结果

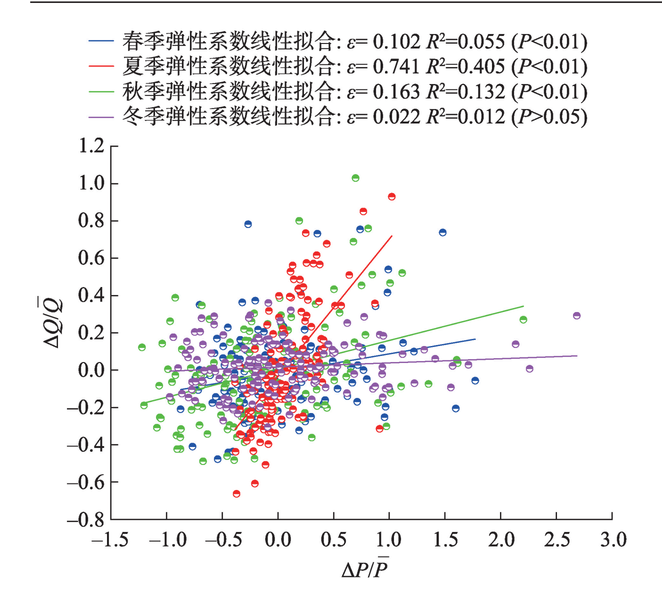
Fig. 4 Statistical results of runoff at high/medium/low flow year in the Heihe River Basin

区，所以本文选取人类活动对水文过程影响较小的八宝河流域和人类活动对其水文过程影响较大的山丹河流域这2个典型流域研究径流和不同土地利用类型的相关关系。研究发现，径流量与林地面积、建设用地面积呈正相关，而径流量与草地面积呈负相关(图7)，这与阳扬等[27]的研究结果一致。

整体而言，黑河流域在1980—2020年径流量共增加了5.30×10^8 m^3，耕地和建设用地面积呈明显增

chinaXiv:202210.00156v1

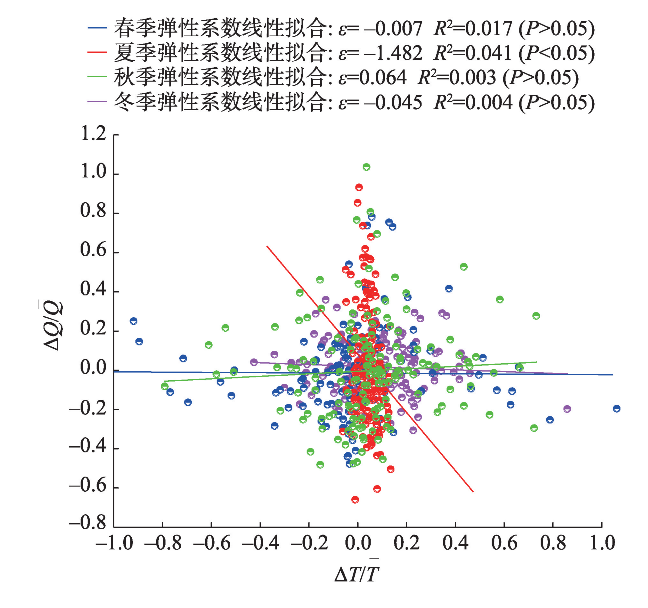
ChinaXiv合作期刊



注：ΔQ 为径流量距平值；$\bar{Q}$ 为径流量平均值；ΔP 为降水距平值；$\bar{P}$ 为降水平均值；ε 为弹性系数。下同。

图5 黑河流域季节径流与降水序列变化比例间关系

Fig. 5 Relationship between seasonal runoff and the proportional change in precipitation series in the Heihe River Basin



注：ΔT 为气温距平值；$\bar{T}$ 为气温平均值。

图6 黑河流域季节径流与气温序列变化比例间关系

Fig. 6 Relationship between seasonal runoff and the proportional change in temperature series in the Heihe River Basin

加趋势，增长率分别为399.27 km²·a⁻¹、97.22 km²·a⁻¹，2020年较1980年耕地、建设用地面积分别增加了2726.32 km²和707.30 km²，相对增幅分别为24.20%和71.43%；草地和未利用土地面积呈减少趋势，递减率分别为−127.22 km²·a⁻¹、−331.76 km²·a⁻¹，2020年较1980年草地、未利用土地面积分别减少了630.14 km²和2764.90 km²，相对降幅分别为1.30%和5.28%；林地和水域面积变化趋势不明显，基本保持相对稳定状态。为探究黑河流域径流对土地利用变化的响应，将整个研究区分时段、分类型和分区域（图8），即分别研究不同时段不同土地利用类型对小流域径流的影响。丰乐河流域1981—1990年和2011—2020年林地面积的减小对径流量有一定的削减作用；丰乐河1991—2020年、八宝河2011—2020年林地面积的增加导致了径流量的增加；洪水河流域1991—2010年、梨园河流域1981—2010年和黑河干流2001—2010年草地面积的减少导致了径流量的增多；讨赖河流域1991—2010年、丰乐河流域1991—2010年、黑河干流2011—2020年、山丹河流域2011—2020年径流量增多主要是因为城镇等建设用地面积的扩张，而讨赖河流域1981—1990年径流量减少主要是因为城镇等建设用地面积的缩减。

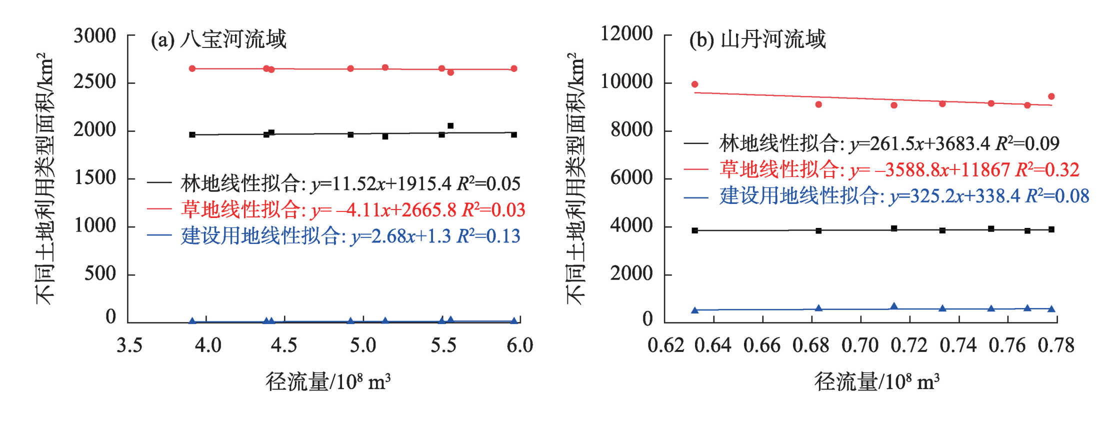


图7 径流与不同土地利用类型相关性

Fig. 7 Correlation between runoff and different land use types

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

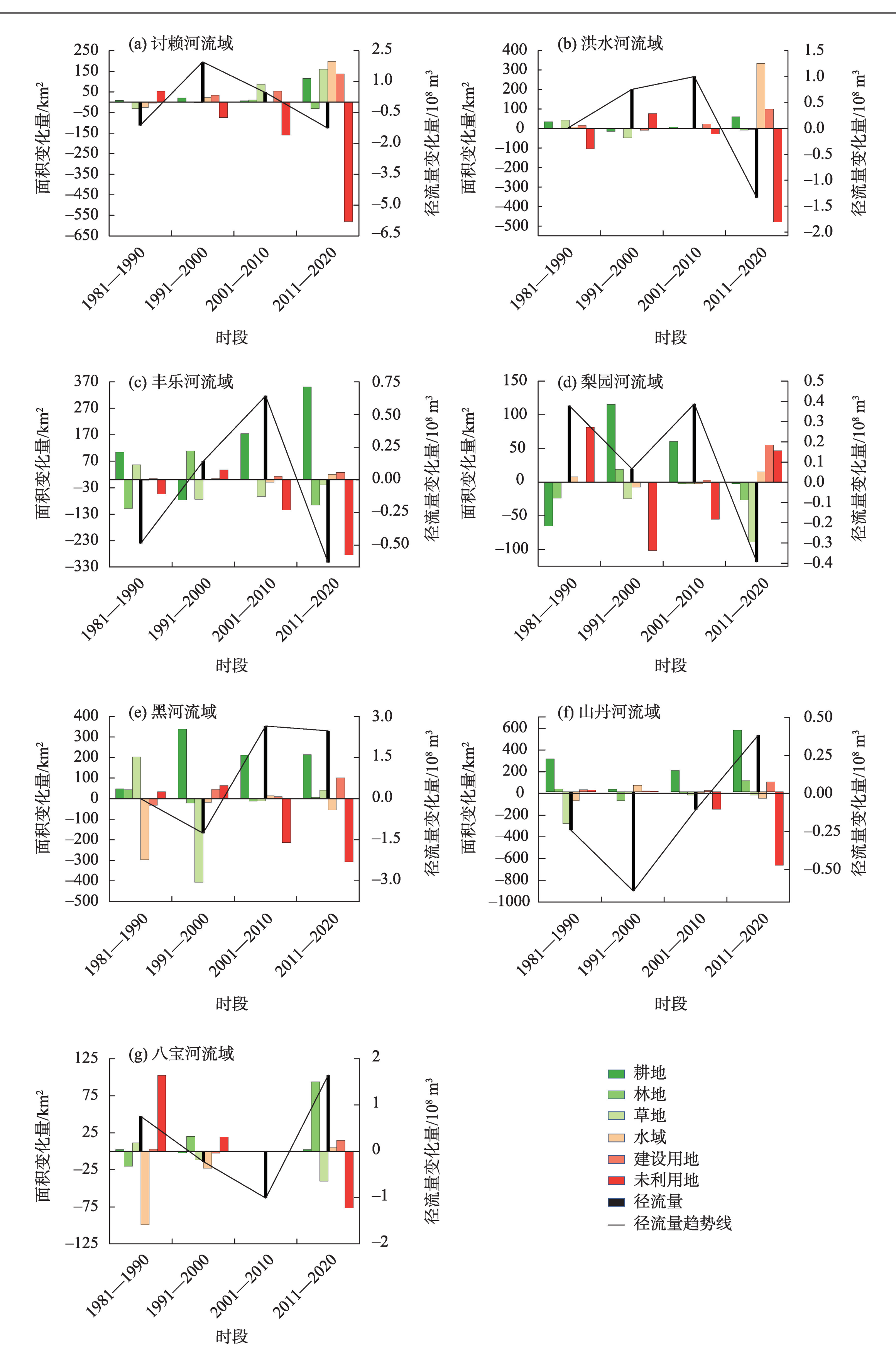


图 8　不同时段黑河流域径流变化量和不同土地利用类型面积变化量

Fig. 8　Runoff variation and area variation of different land use types in the Heihe River Basin at different time periods

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

3.4 径流对冰冻圈变化的响应

冰冻圈是气候变化响应最为敏感的区域，也对流域水文过程影响巨大[28-30]。以多年冻土下界为边界可将流域划分为植被带(海拔2000~3600 m)和冰冻圈带(海拔3600 m以上)[31]，已有研究发现，黑河径流的80%来自冰冻圈带的降水和融水[32]。首先是冰川融水、冻土融水和降水下渗转化为地下水，然后对河流进行补给，冻土融水和冰川融水对黑河流域径流的贡献率分别为28%和7%[33]；讨赖流域出口径流的78%来自冰冻圈带，其中在讨赖河源区冻土融水和冰川融水对径流的贡献率分别为38%和11%，而在嘉峪关站出口冻土融水和冰川融水对径流的贡献率分别下降到了15%和6%[31]；冰川融水对梨园河和洪水河出山口径流的贡献率分别达到了7%和57%[34]。20世纪60年代以来，由于气温持续升高，同时降水增加，冰川和冻土发生了严重融化[35]。黑河流域径流量的增加虽然主要是因为降水的增加，但源区冰冻圈融水的增加对径流量增加的贡献也是不容忽略的[36]；在过去几十年里，冰川面积整体一直处于减少变化趋势，从1980年的496.24 km^{2}退缩到2018年的246.60 km^2，共退缩了249.64 km^2，退缩率为50%，多年平均退缩速率为−7.22 km^2·a^{-1}，退缩明显(图9a)。也就是说，由于气温升高，黑河源区冰雪大量融化，预计短期内会导致黑河来水量持续增加[37-38]，但对于长期而言，冰川退化造成山区水储量减少，未来必然导致径流减少，并加剧水资源短缺[39]。并且冰川融水和冻土融水对径流补给高度集中在夏季，这与降水补给具有较好的同步性，将会加剧径流年内分配的不均匀性[40](图9b)。

4 结 论

基于黑河流域径流、气象和土地利用等资料，全面系统地研究了黑河流域干流及主要支流的径流变化特征，探讨了径流对气候变化、土地利用类型变化和冰冻圈变化的响应关系，主要得到以下结论：

(1) 1990年后黑河流域径流增加趋势明显加速，并且在黑河干流表现最为明显，1957—1990年莺落峡站径流量增加速率为0.75×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$，而1991—2020年其增加速率为2.60×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$，后者是前者的3.47倍；并且黑河全流域1990年后径流量增加主要发生在夏季和秋季，较1990年前分别增加了7.07%和26.58%，而丰乐河流域、梨园河流域和八宝河流域径流增加主要发生在冬季。

(2) 黑河流域春季、夏季、秋季和冬季径流对降水的弹性系数分别为0.102(P<0.01)、0.741(P<0.01)、0.163(P<0.01)和0.022(P>0.05)；四季径流对气温的弹性系数分别为−0.007(P>0.05)、−1.482(P<0.05)、0.064(P>0.05)和−0.045(P>0.05)。径流对气候变化的响应在夏季最为敏感，并且降水是导致径流增多的主要气候因素，夏季降水增加1.000%，同期径流量平均增多0.741%(P<0.01)。

(3) 2020年较1980年黑河流域耕地和建设用地面积相对增幅分别为24.20%和71.43%；草地和未利用土地面积相对降幅分别为1.30%和5.28%。径流量与林地面积、建设用地面积呈正相关，而径流量与草地面积呈负相关。

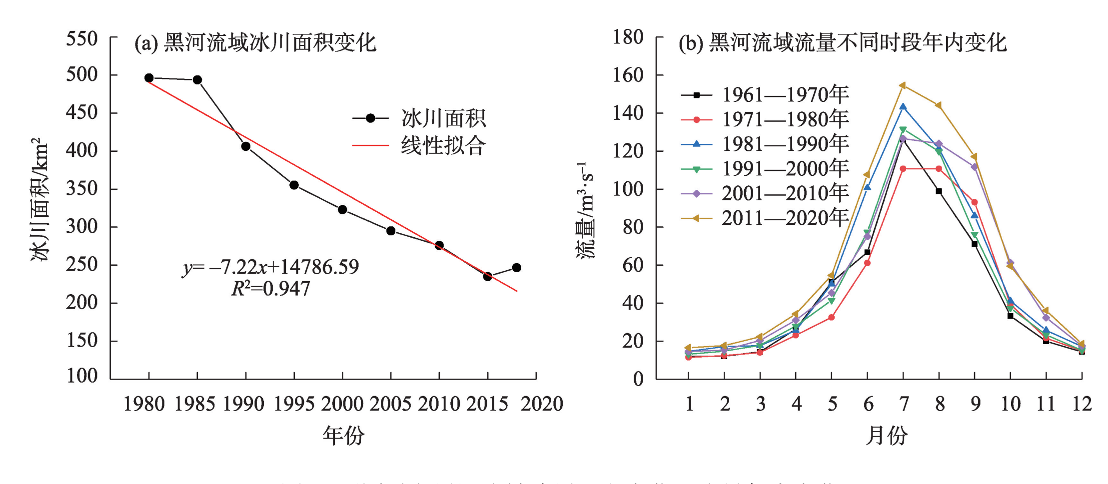


图9 不同时段黑河流域冰川面积变化和流量年内变化

Fig. 9 Glacier area variation and annual variation of flow in Heihe River Basin at different time periods

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

参考文献(References)

[1] IPCC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis[C]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press.

[2] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从AR5到AR6的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667-671. [Zhou Botao. Global warming: Scientific progress from AR5 to AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 667-671.]

[3] 王毅, 张晓美, 周宁芳, 等. 1990—2019年全球气象水文灾害演变特征[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 496-506. [Wang Yi, Zhang Xiaomei, Zhou Ningfang, et al. Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(4): 496-506.]

[4] 程国栋, 赵传燕, 王瑶. 内陆河流域森林生态系统生态水文过程研究[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1125-1130. [Cheng Guodong, Zhou Chuanyan, Wang Yao. Advances in researches of ecological and hydrological processes in the forest ecosystem in inland river basin of the arid regions, China[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(11): 1125-1130.]

[5] 胡秀芳, 赵军, 王蓓, 等. 黑河流域生态系统服务空间协同与权衡变化[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 580-588. [Hu Xiufang, Zhao Jun, Wang Bei, et al. Change of spatial synergies or trade-offs of ecosystem services in Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(3): 580-588.]

[6] 桂娟, 王旭峰, 李宗省, 等. 典型冰冻圈地区植被变化对人类活动的响应研究——以祁连山为例[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1235-1243. [Gui Juan, Wang Xufeng, Li Zongxing, et al. Research on the response of vegetation change to human activities in typical cryosphere areas: Taking the Qilian Mountains as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1235-1243.]

[7] 郭昆明, 颉耀文, 王晓云, 等. 黑河流域1960—2015年气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 253-260. [Guo Kunming, Xie Yaowen, Wang Xiaoyun, et al. Characteristics of spatio-temporal distribution of temperature in the Heihe River Basin during the period 1960—2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(2): 253-260.]

[8] 别强, 强文丽, 王超, 等. 1960—2010年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574-582. [Bie Qiang, Qiang Wenli, Wang Chao, et al. Monitoring glacier variation in the upper reaches of Heihe River based on remote sensing in 1960—2010[J]. Journal of Claciology and Geocryology, 2013, 35(3): 574-582.]

[9] 范泽孟. 黑河流域植被垂直分布对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4066-4076. [Fan Zemeng. Response analysis of gradient distribution of vegetation to climate change in Heihe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4066-4076.]

[10] 金晓媚. 黑河流域天然植被的面积变化研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(增刊1): 166-169. [Jin Xiaomei. The variability of natural vegetation area in the Heihe River Basin, north-west China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(Suppl. 1): 166-169.]

[11] 肖洪浪, 程国栋, 李彩芝, 等. 黑河流域生态-水文观测试验与水-生态集成管理研究[J]. 地球科学进展, 2008, 163(7): 666-670. [Xiao Honglang, Cheng Guodong, Li Caizhi, et al. Eco-hydrological observational experiments of the Heihe River Basin and integrated eco-water management research at watershed scale[J]. Advances in Earth Science, 2008, 163(7): 666-670.]

[12] 肖生春, 肖洪浪, 蓝永超, 等. 近50 a来黑河流域水资源问题与流域集成管理[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 529-535. [Xiao Shengchun, Xiao Honglang, Lan Yongchao, et al. Water issues and integrated water resource management in Heihe River Basin in recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 529-535.]

[13] 程鹏, 孔祥伟, 罗汉, 等. 近60 a以来祁连山中部气候变化及其径流响应研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1192-1201. [Cheng Peng, Kong Xiangwei, Luo Han, et al. Climate change and its runoff response in the middle section of the Qilian Mountains in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1192-1201.]

[14] 程文举, 席海洋, 张经天. 黑河上游径流对极端气候变化的响应研究[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 120-129. [Cheng Wenju, Xi Haiyang, Zhang Jingtian. Response of runoff to extreme climate change in the upper reaches of the Heihe River[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 120-129.]

[15] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 31-39. [Li Qiuju, Li Zhanling, Wang Jie. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technolog, 2019, 17(3): 31-39.]

[16] 罗开盛, 陶福禄. 黑河径流对LUCC和气候变化的敏感性分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 753-760. [Luo Kaisheng, Tao Fulu. Sensitivity of runoff to LUCC and climate change in the Heihe River Basin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 753-760.]

[17] 尚星星. 气候与土地利用变化对地表径流的影响研究——以黑河上游为例[D]. 西安: 西北大学, 2019. [Shang Xingxing. Impacts of climate and land use change on surface runoff: A case study of the upper Heihe River[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]

[18] 金鑫, 金彦香, 杨登兴. 基于LU-SWAT模型的土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究——以黑河上游为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 114-121. [Jin Xin, Jin Yanxiang, Yang Dengxing. Using LU-SWAT model to analyze the response of hydrological processes to land use/coverage with application to an upper watershed in Heihe Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 114-121.]

[19] 王宇涵, 杨大文, 雷慧闽, 等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1064-1071. [Wang Yuhan, Yang Dawen, Lei Huimin, et al. Impact of cryosphere hydrological processes on the runoff in the upper reaches of Heihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1064-1071.]

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

[20] GB/T50095-98. 水文基本术语和符号标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [GB/T 50095-98. Standard for essential technical terms and symbols in hydrology[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 1999.]

[21] 徐宇程, 朱首贤, 张文静, 等. 长江大通站径流量的丰平枯水年划分探讨[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 19-23. [Xu Yucheng, Zhu Shouxian, Zhang Wenjing, et al. Classification of high/medium/low flow year of the Yangtze River according to runoff at Datong Station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(6): 19-23.]

[22] Tang Y, Tang Q H, Wang Z G, et al. Different precipitation elasticity of runoff for precipitation increase and decrease at watershed scale[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124 (22): 11932-11943.

[23] 陈莹, 陈兴伟. 基于弹性分析的闽江流域径流演变与气候变化关系[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2011, 27(6): 101-105. [Chen Ying, Chen Xingwei. Relationship between the changes of runoff and climate in the Min River Basin based on elasticity analysis[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2011, 27(6): 101-105.]

[24] Li Z X, Yuan R F, Feng Q, et al. Climate background, relative rate, and runoff effect of multiphase water transformation in Qilian Mountains, the third pole region[J]. Science of the Total Environment, 2019, 663: 315-328.

[25] 刘希胜, 李其江, 段水强, 等. 黄河源径流演变特征及其对降水的响应[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1721-1730. [Liu Xisheng, Li Qijiang, Duan Shuiqiang, et al. Runoff change and responses to precipitation in the source regions of the Yellow River[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1721-1730.]

[26] 权瑞松, 刘敏, 侯立军, 等. 土地利用动态变化对地表径流的影响——以上海浦东新区为例[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 44-49. [Quan Ruisong, Liu Min, Hou Lijun, et al. Impact of land use dynamic change on surface runoff: A case study on Shanghai Pudong New District[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(1): 44-49.]

[27] 阳扬, 翟禄新, 贾艳红, 等. 不同土地利用方式下漓江流域降水-径流特征变化分析研究[J/OL]. 中国农村水利水电. [2021-12-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20211215.1648.050.html. [Yang Yang, Zhai Luxin, Jia Yanhong, et al. Analysis of the change of rainfall-runoff characteristics in the Lijiang River Basin under different landuse[J/OL]. China Rural Water and Hydropower. [2021-12-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20211215.1648.050.html.]

[28] 王根绪, 杨燕, 张光涛, 等. 冰冻圈生态系统: 全球变化的前哨与屏障[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 425-433. [Wang Genxu, Yang Yan, Zhang Guangtao, et al. Cryosphere ecosystems: Outpost and barrier in global change[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 425-433.]

[29] 丁永建, 张世强, 陈仁升. 冰冻圈水文学: 解密地球最大淡水库[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 414-424. [Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng. Cryospheric hydrology: Decode the largest freshwater reservoir on earth[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 414-424.]

[30] 陈仁升, 康尔泗, 吉喜斌, 等. 黑河源区高山草甸的冻土及水文过程初步研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 387-396. [Chen Rensheng, Kang Ersi, Ji Xibin, et al. Preliminary study of the hydrological processes in the alpine meadow and permafrost regions at the headwaters of Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 387-396.]

[31] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, et al. Quantitative evaluation on the influence from cryosphere meltwater on runoff in an inland river basin of China[J]. Global and Planetary Change, 2016, 143: 189-195.

[32] 王宁练, 张世彪, 贺建桥, 等. 祁连山中段黑河上游山区地表径流水资源主要形成区域的同位素示踪研究[J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2148-2152. [Wang Ninglian, Zhang Shibiao, He Jianqiao, et al. Tracing the major source area of the mountainous runoff generation of the Heihe River in northwest China using stable isotope technique[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2148-2152.]

[33] Li Z X, Feng Q, Wang Q J, et al. The influence from the shrinking cryosphere and strengthening evopotranspiration on hydrologic process in a cold basin, Qilian Mountains[J]. Global and Planetary Change, 2016, 144: 119-128.

[34] 贺建桥, 宋高举, 蒋熹, 等. 2006年黑河水系典型流域冰川融水径流与出山径流的关系[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1186-1189. [He Jianqiao, Song Gaoju, Jiang Xi, et al. Relation between glacial meltwater runoff and mountainous runoff in 2006 in four typical river basins of Heihe River water system[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1186-1189.]

[35] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 365-377. [Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 365-377.]

[36] Zhang A J, Zheng C M, Wang S, et al. Analysis of streamflow variations in the Heihe River Basin, northwest China: Trends, abrupt changes, driving factors and ecological influences[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2015, 3: 106-124.

[37] 程建忠, 陆志翔, 邹松兵, 等. 黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 123-129. [Cheng Jianzhong, Lu Zhixiang, Zou Songbing, et al. Variation of the runoff in the upper and middle reaches of the main Heihe River and its causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 123-129.]

[38] 沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 244-250. [Shen Yongping, Liu Shiyin, Zhen Lili, et al. Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi Region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 244-250.]

chinaXiv:202210.00156v1

ChinaXiv合作期刊

[39] 汤远航, 李梦琦, 邓铃, 等. 1990—2020年朋曲流域冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 27-36. [Tang Yuanhang, Li Mengqi, Deng Ling, et al. Glacier change and its response to climate change in Pumqu Basin during 1990—2020 [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 27-36.]

[40] 蓝永超, 丁永建, 刘进琪, 等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 71-76. [Lan Yongchao, Ding Yongjian, Liu Jinqi, et al. Change of water resources in mountainous area of Heihe River under global-warming scene[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 71-76.]

Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains

LIANG Pengfei[1,2], XIN Huijuan[1], LI Zongxing[2], ZHANG Baijuan[3], GUI Juan[3], DUAN Ran[3], NAN Fusen[3], DINGZENG Yangping[4], YANG Shengmei[4]

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine Region/Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center/Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Tibet Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changdu 854000, Xizang, China)

Abstract: Based on the data of runoff, meteorology, and types of land use, the characteristics of and contributors to runoff changes in the Heihe River of China were studied using elasticity coefficients and other methods. (1) The results show a trend of increasing runoff, with significant acceleration after 1990 and which was most obvious in the Heihe River, specifically at Yingluoxia station. Here the rate of increase in runoff from 1957 to 1990 was 0.75×10^{8} $m^{3}\cdot(10a)^{-1}$, whereas the rate of increase from 1991 to 2020 was 2.60×10^{8} $m^{3}\cdot(10a)^{-1}$, the latter being 3.47 times higher than the former. This increase in runoff mainly occurred in summer and autumn, with increases of 7.07% and 26.58%, respectively, compared with the pre-1990 period in the Heihe River Basin. (2) The effects of climate change on runoff were most acute in summer, with precipitation being the main climatic factor contributing to increased runoff. A 1.000% increase in summer precipitation was associated with a 0.741% average increase in runoff over the same period ($P<0.01$). (3) The relative increases in arable land and construction land area in 2020 compared with 1980 in the Heihe River Basin were 24.20% and 71.43%, respectively; the relative decreases in grassland and unused land area were 1.30% and 5.28%, respectively. The area of forested land, area of construction land, and runoff are positively correlated, whereas the area of grassland is negatively correlated with runoff. The results of this study can provide a reference for the rational allocation, scientific management, and subsequent implementation of ecological projects in the Heihe River Basin.

Key words: Heihe River Basin; runoff response; climate change; cryosphere; influencing factors

chinaXiv:202210.00156v1